*Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (1-24)*

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

# Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending Process by Response Surface Method

Research Article

Aliakbar Asgharpour[1], Mohammad Bakhshi-Jooybari[2], Hamid Gorji[3]

*DOI: 10.22067/jacsm.2023.82668.1185*

## 1. Introduction

The laser-forming process is a non-contact method that uses laser energy to form and bend sheets without using rigid tools or external force. The ability to form sheet metals with high strength, not using a set of tools, the flexibility of the process, and good automation capability combined with other laser applications, such as cutting and welding, are among the significant advantages of this method compared to other traditional forming processes. These advantages are mainly due to the use of a laser beam as a part of the deformation tool in the process. The principle of the laser-bending process is depicted in Fig 1.

Most of the materials used in the research were titanium, magnesium, steel, and their alloys. In this paper, the extent and type of the influence of different parameters on the laser-bending process, such as laser energy parameters and geometric parameters of the sheet on the bending angle were studied. Moreover, their values were optimized to achieve the maximum bending angle using experimental, numerical, and statistical methods on a 6061 aluminum sheet. Therefore, the moot point investigated in this paper is to achieve a correct understanding of the impact of various process parameters on the bending angle and to achieve the maximum bending angle by optimizing the existing parameters of the process.

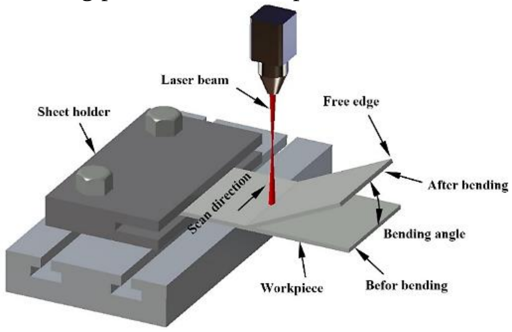



**Figure 1. Schematic of the laser-bending process**

## 2. Experimental setup procedure

A Nd: YAG pulsed laser machine (model 4297 PMT) with a maximum power of W400 was employed to perform the experimental tests. The specimens used in the experimental tests are made of AA 6061 sheets with dimensions of 2 × 50 × 100 mm. The sheet surface was covered by the graphite spray to increase the absorption coefficient of the laser beam. To measure the bending angle created in the specimen, a coordinate measuring machine CMM Mora3 with an accuracy of 0.001 mm was used. To measure the bending angle using the CMM machine, the position of 4-5 points was determined on each of the bent plates of the sheet. Next, by determining the passing plane through the identified points, the bending angle between the two planes was calculated in Inca 3D software. Figure 2 represents the experimental setup along with the bent sheet.

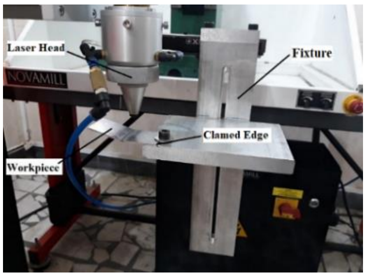



**Figure 2. Experimental setup of the laser-bending process**

## 3. Numerical simulation

The model dimensions used in the simulation were considered the same as the dimensions of the sheet in the experimental tests. The heat flux created by the laser beam leads to high-temperature differences that affect the material properties; therefore, temperature-dependent properties were used in the simulations. In addition, mechanical boundary conditions were used to limit the displacement of the sheet during the simulation process. The subroutine DFLUX of the ABACUS software was utilized to define heat flux with non-uniform distribution as a function of temperature, time, and position. The amount of heat flux density applied to the surface was calculated using Equation 1.

*Manuscript received: May 29, 2023. Revised, July 30, 2023, Accepted, October 9, 2023.

[1]. M.Sc. Graduate, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

[2]. Corresponding author: Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran. **Email**: bakhshi@nit.ac.ir

[3]. Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} exp(-\frac{2r^2_1}{r^2}) \quad (1)$$

Therefore, the average heat flux within the laser beam diameter range is calculated by integrating heat flux function in the range of laser beam radius (Equation 2).

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2}\int_0^r I(2\pi r_1)dr_1$$

$$= \frac{2\pi}{\pi r^2}\int_0^r \frac{2AP}{\pi r^2} exp(-\frac{2r^2_1}{r^2})(r_1)dr_1 = \frac{0/865AP}{\pi r^2} \quad (2)$$

In order to simulate the laser-bending process, the element type C3D8T was used. In addition, five elements were created along the sheet thickness for an accurate representation of the thermal gradient. Figure 3 illustrates the model with the assigned mesh used in this study.

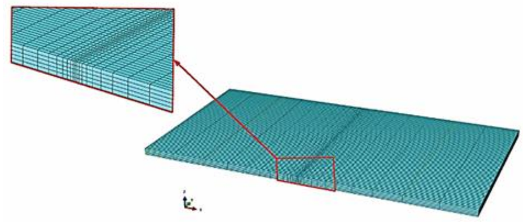


**Figure 3. Meshing the 3D model of the sheet**

## 4. Optimization by Response Surface Method

The behavioral modeling of the process is a method that can provide acceptable accuracy by eliminating time-consuming and costly experiments. One of the most common methods of behavioral modeling is the response surface methodology (RSM). The purpose of using this method is to determine a relationship between the response (Y) and several controllable or input variables, which are illustrated by $X_1$, $X_2$, ..., and $X_K$. RSM can be designed into different methods according to their application. In this study, the central composite design (CCD) method was used to optimize and evaluate the effect of parameters in the laser-bending process. Table 1 shows the selected parameters and their corresponding values.

**Table 1. Selected parameters and their corresponding levels**

| Factors | Unit | Symbol | Levels | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | −α | −1 | 0 | +1 | +α |
| Laser power | W | P | 375 | 400 | 425 | 450 | 475 |
| Beam diameter | mm | D | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 |
| Scan velocity | mm/s | V | 14 | 18 | 22 | 26 | 30 |
| Step time | s | t | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| Pass number | - | n | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
| Sheet length | mm | L | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
| Sheet width | mm | W | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Sheet thickness | mm | S | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 |

## 5. Results and Discussion

### *Experimental results*

Two specimens of AA 6061 sheets with a thickness of 2 mm were tested at different laser powers in order to examine the repeatability of the experimental tests. The values of these parameters and their measured bending angle are illustrated in Table 2. According to the results shown in Table 2, the AA 6061 sheet bending using the laser-bending process has a high repeatability.

**Table 2. Parameters and values used in the experimental test**

| Laser power (W) | Scan velocity (mm/s) | Pass number | Beam diameter (mm) | Bending angle sample 1 | Bending angle sample 2 | Deviation (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 220 | 10 | 7 | 3 | 0.636 | 0.649 | 2 |
| 240 | 15 | 10 | 3 | 0.784 | 0.789 | 0.6 |
| 270 | 10 | 8 | 3 | 1.171 | 1.168 | 0.3 |
| 330 | 15 | 8 | 3 | 1.296 | 1.238 | 1 |

### *Validation of numerical simulation*

In order to validate the simulation results, the experimental test was conducted for five laser power values of 240, 270, 300, 330, and 390 W, while other parameters were considered constant. The results of comparing experimental and simulation results are shown in Figure 4. As can be seen, there is a good agreement between the bending angle obtained from the simulation and the experimental tests.

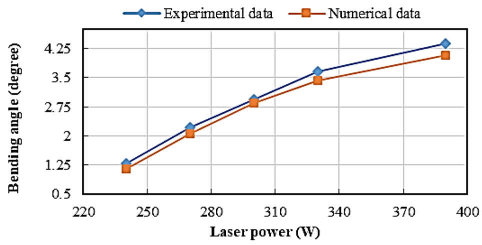



**Figure 4. Comparison of experimental and simulation results under the conditions: D=3mm, V=18mm/s, S=2mm, n=9**

### *Simulation results*

An important phenomenon that occurs in the laser-bending process using the temperature gradient mechanism (TGM) is the counter-bending at the beginning of the process. This phenomenon cannot be observed due to the small amount. The counter-bending is observable by plotting a diagram of the free-edge displacement of the sheet in terms of the time obtained from the numerical simulation results. Figure 5 shows the time-displacement graph.

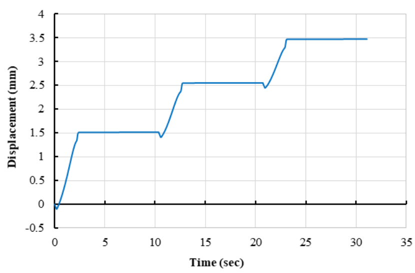



**Figure 5. Time-displacement graph**

Figure 6 indicates the graph of temperature versus time. This graph shows the temperature difference between the top and bottom surfaces of the sheet obtained from the numerical simulation. The created temperature

difference is the cause of the TGM. The maximum temperature difference between the upper and lower surfaces of the sheet is 350°C.

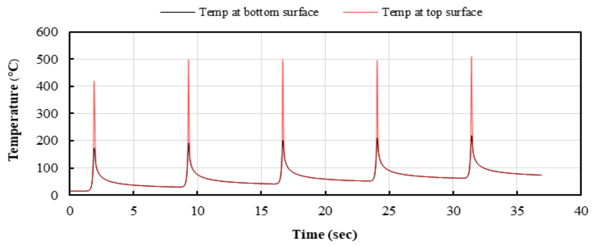



**Figure 6. Temperature-time graph at the center of the sheet**

***Effect of process parameters***

The influence of each of the examined parameters on the bending angle is shown in Figure 7.

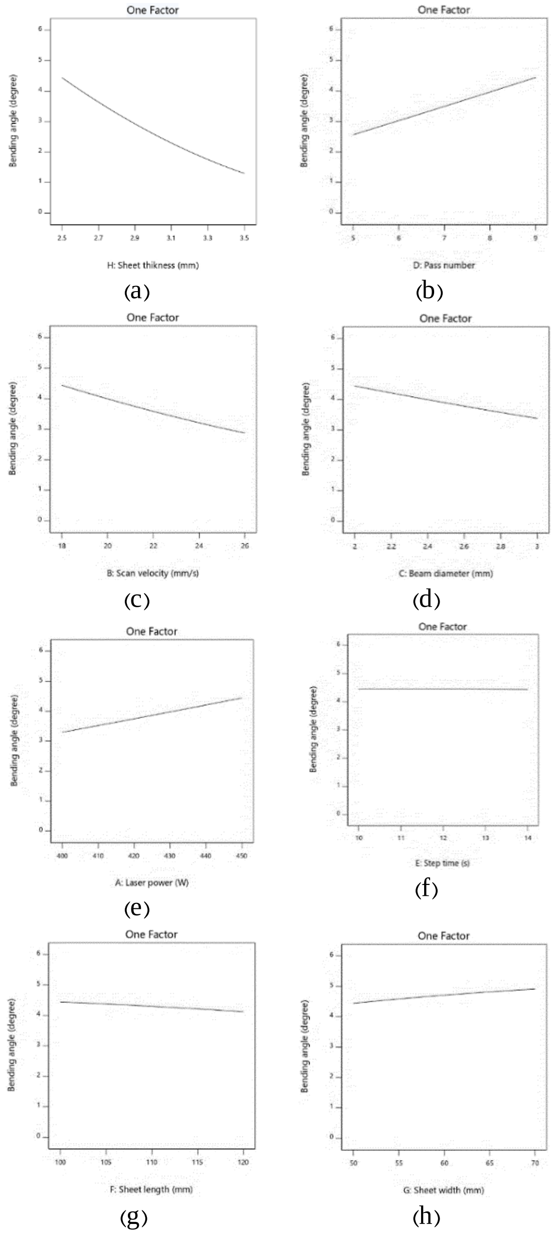



**Figure 7. Influence of parameters on the bending angle**

According to the evaluations conducted based on the design of the experiment (DOE) using the CCD method, with the increase in thickness from 2.5 mm to 3.5 mm, the bending angle decreased from 1.7° to 0.379°; that is, with an increase of 1 mm in the thickness in two experiments with the combination of specific parameters based on the DOE conducted in this study, the bending angle decreased by about 77%. On the other hand, with the rise in the pass number, the value of the bending angle augments. Increasing the pass number means replicating the laser radiation, which increases the bending angle. However, as the scan velocity rises, the value of the bending angle will decline because as the scan velocity increases, the amount of thermal energy applied to the surface of the sheet along the scanning path decreases. Raising the laser beam diameter leads to a decrease in the bending angle. In other words, as the laser beam diameter increases, the energy intensity per unit area of the sheet decreases, and as a result, the value of the bending angle also decreases, while the bending angle rises with increasing laser power. Increasing the laser power means raising the input energy and the effect of the laser energy. The results showed that the slant of the graph for step time, sheet length, and sheet width have the lowest values compared to other parameters. Therefore, the parameters of step time, sheet length, and sheet width do not have a great effect on the bending angle, so the effect of these three parameters on the bending angle can be ignored in this process.

In order to validate the effects shown for the parameters, an analysis of variance was used. This analysis was performed assuming the normality of the error distribution, the stability of the variance, and its independence. The normal probability plot of the residual is shown in Figure 8. The scatter of the test points around the diagonal line indicates that experiments were performed correctly and reliable results were obtained.

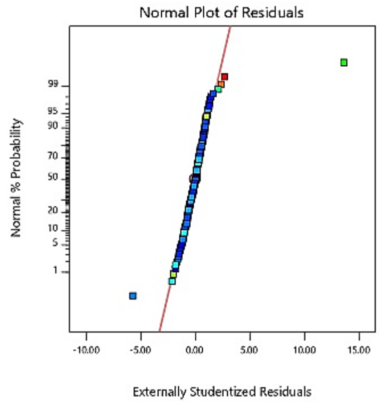



**Figure 8. Normal probability plot of residuals**

The most important results of analysis of variance (ANOVA) are shown in Table 3. This table summarizes the effectiveness or ineffectiveness of the factors evaluated in this study and also the extent of the impact of each of the effective factors in the process. As can be seen, all selected parameters with a p-value of less than 0.05 are among the effective parameters in the process. In addition, the F-value denotes the effectiveness of every parameter in the process. Generally, the higher F-value of a parameter showed the higher influence of that parameter.

**Table 3. ANOVA table for parameters**

| source | sum of squares | Mean square | F –Value | p-value |
|---|---|---|---|---|
| **Model** | 350.61 | 7.97 | 224.91 | < 0.0001 |
| A-Laser power | 22.69 | 22.69 | 640.52 | < 0.0001 |
| B-Scan velocity | 34.72 | 34.72 | 979.90 | < 0.0001 |
| C-Beam diameter | 20.67 | 20.67 | 583.46 | < 0.0001 |
| D-Pass number | 41.95 | 41.95 | 1184.20 | < 0.0001 |
| E-Step time | 0.1108 | 0.1108 | 3.13 | 0.0782 |
| F-Sheet length | 1.18 | 1.18 | 33.35 | < 0.0001 |
| G-Sheet width | 3 | 3 | 84.74 | < 0.0001 |
| H-Sheet thickness | 171.45 | 171.45 | 4839.21 | < 0.0001 |
| AB | 0.7849 | 0.7849 | 22.15 | < 0.0001 |
| AC | 0.4177 | 0.4177 | 11.79 | 0.0007 |
| AD | 2.09 | 2.09 | 58.96 | < 0.0001 |
| AE | 0.0114 | 0.0114 | 0.3205 | 0.5718 |
| AF | 0.0368 | 0.0368 | 1.04 | 0.3092 |
| AG | 0.2649 | 0.2649 | 7.48 | 0.0067 |
| AH | 5.25 | 5.25 | 148.24 | < 0.0001 |
| BC | 0.823 | 0.823 | 2.32 | 0.1289 |
| BD | 3.82 | 3.82 | 107.89 | < 0.0001 |
| BE | 0.0020 | 0.0020 | 0.0551 | 0.8146 |
| BF | 0.1247 | 0.1247 | 3.52 | 0.0618 |
| BG | 0.0396 | 0.0396 | 1.12 | 0.2916 |
| BH | 11.79 | 11.79 | 332.74 | < 0.0001 |
| CD | 2.30 | 2.30 | 65.01 | < 0.0001 |
| CE | 0.0111 | 0.0111 | 0.3123 | 0.5768 |
| CF | 0.0031 | 0.0031 | 0.0887 | 0.7661 |
| CG | 0.1706 | 0.1706 | 4.82 | 0.0292 |
| CH | 4.23 | 4.23 | 119.49 | < 0.0001 |
| DE | 0.0129 | 0.0129 | 0.3648 | 0.5464 |
| DF | 0.0593 | 0.0593 | 1.67 | 0.1969 |
| DG | 0.4470 | 0.4470 | 12.62 | 0.0005 |
| DH | 18.25 | 18.25 | 515.25 | < 0.0001 |
| EF | 0.0353 | 0.0353 | 0.9969 | 0.3191 |
| EG | 0.0823 | 0.0823 | 2.32 | 0.1289 |
| EH | 0.0004 | 0.0004 | 0.0104 | 0.9189 |
| FG | 0.0056 | 0.0056 | 0.1590 | 0.6904 |
| FH | 0.6295 | 0.6295 | 17.77 | < 0.0001 |
| GH | 0.3711 | 0.3711 | 10.47 | 0.0014 |
| $A^2$ | 0.0033 | 0.0033 | 0.7602 | 0.0933 |
| $B^2$ | 0.1770 | 0.1770 | 0.0264 | 5.00 |
| $C^2$ | 0.0191 | 0.0191 | 0.4638 | 0.5386 |
| $D^2$ | 0.0028 | 0.0028 | 0.7782 | 0.0795 |
| $E^2$ | 0.0029 | 0.0029 | 0.7737 | 0.0829 |
| $F^2$ | 0.0108 | 0.0108 | 0.5821 | 0.3038 |
| $G^2$ | 0.0343 | 0.0343 | 0.3264 | 0.9671 |
| $H^2$ | 2.55 | 2.55 | 72.03 | < 0.0001 |
| Residual | 8.40 | 0.0354 | – | – |
| Lack of Fit | 8.40 | 0.0368 | – | – |
| Pure Error | 0.001 | 0.00018 | – | – |
| Adeq Precision | 68.4682 | – | – | – |
| Cor Total | 359.01 | – | – | – |

### *Optimizing the laser-forming process*

The purpose of optimization is to reach the maximum value for the bend angle. Considering the specified limits for the process parameters, the optimal value for reaching the maximum bending angle for each parameter is shown in Figure 9. Moreover, Figure 9 demonstrates the lowest (0.008°) and highest (5.369°) actual values for the bend angle, while the maximum bending angle predicted by the regression model considering the optimal values for each parameter is 4.911°.

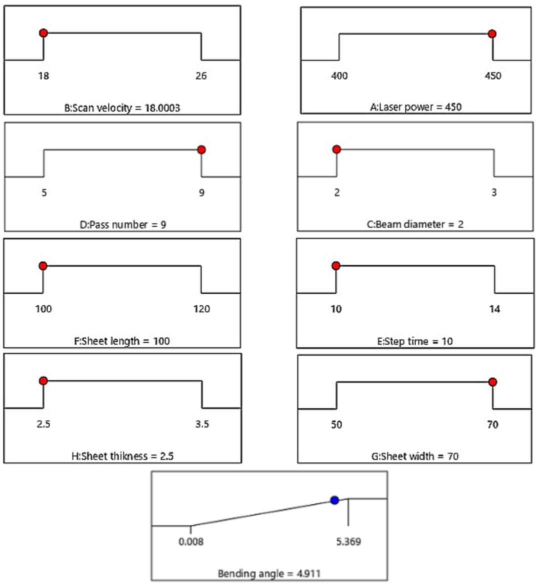



**Figure 9. Optimal value of each parameter**

## 7. Conclusion

In order to investigate the effect of parameters on the laser-bending process and to optimize the parameters to achieve the maximum bending angle, the process parameters were numerically, experimentally, and statistically investigated. The following results were summarily obtained from this study:

- Among the eight investigated parameters, the parameters of sheet thickness, pass number, scan velocity, laser power, and laser beam diameter were introduced as the parameters that had the greatest influence on the bending angle.
- Step time as well as the length and width of the sheet were identified as the parameters that do not have much effect on the bending angle.
- The experimental and numerical results demonstrated that sheet thickness, laser beam diameter, scan velocity, step time, and sheet length have an inverse relationship with bending angle. On the other hand, the three remaining parameters, i.e. laser power, pass number, and sheet width, are directly related to the bending angle in this process.
- The results of the simulation revealed that the value of the bending angle increases with a rise in the number of pass numbers, but the value of the increase in the bending angle in the number of high passes per pass decreases slightly.
- The optimization results showed that the maximum bending angle obtained through the model (4.911°) is obtained when the sheet thickness (2.5 mm), laser beam diameter (2 mm), step time (10 s), sheet length (100 mm), and scan velocity (18 mm/s) are at a low level, and the pass number (9), sheet width (70 mm), and laser power (450W) are at a high level.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

# بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی و بهینه‌سازی زاویه خم در خم‌کاری با لیزر به روش سطح پاسخ*

مقاله پژوهشی

علی‌اکبر اصغرپور(۱)    محمد بخشی جویباری(۲)    حمید گرجی(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82668.1185

**چکیده** *فرایند شکل‌دهی با لیزر، یک موضوع تحقیقاتی و صنعتی نسبتا جدید است. مواد استفاده شده در پژوهش‌های انجام شده از سوی محققان، نوعا تیتانیم، منیزیم، فولاد و آلیاژهای آن بوده است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن انعکاس سطحی بالای پرتو لیزر و ضریب جذب پایین، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، ابتدا نحوه و میزان تأثیر پارامترهای مختلف فرایندی بر روی زاویه خم در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شد. سپس، به‌منظور دست‌یابی به حداکثر زاویه خم، تمام پارامترها به روش سطح پاسخ (RSM) بهینه‌سازی شدند. علاوه بر این، تکرارپذیری فرایند به همراه صحت و اعتبار شبیه‌سازی با اندازه‌گیری دقیق زاویه خم با انجام آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که ضخامت ورق بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد، به طوری که با افزایش 1mm در ضخامت ورق، مقدار زاویه خم ۷۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین با بهینه‌سازی پارامترها، حداکثر زاویه خم ۴/۹۱۱ درجه به دست آمد.*

**واژه‌های کلیدی** خم‌کاری با لیزر، بهینه‌سازی، زاویه خم، شبیه‌سازی اجزای محدود، روش سطح پاسخ (RSM).

## Investigating the Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending

Aliakbar Asgharpour    Mohammad Bakhshi-Jooybari    Hamid Gorji

**Abstract** *The laser forming process is an emerging area of research and industry, primarily focused on materials like titanium, magnesium, steel, and their alloys. However, aluminum alloys have received less attention due to challenges related to surface reflection and low absorption coefficients. In this research, the effect of different process parameters on bending angle in the laser bending of Al 6061 sheets was investigated by experiments and finite element simulation. The parameters were optimized by Response Surface Method (RSM) to achieve the maximum bending angle. In addition, the reproducibility of the process, as well as the accuracy and validation of the simulation, were examined by conducting experiments that involved accurate measurement of the bending angle. The results revealed that the sheet thickness had the most significant effect on the bending angle. Specifically, with an increase of 1 mm in the sheet thickness, the bending angle decreased by 77%. Additionally, through process parameter optimization, the maximum bending angle achieved was 4.911 degrees.*

**Key Words** Laser bending, Optimization, Bending angle, Finite element simulation, Response Surface Method (RSM).

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۱۷ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

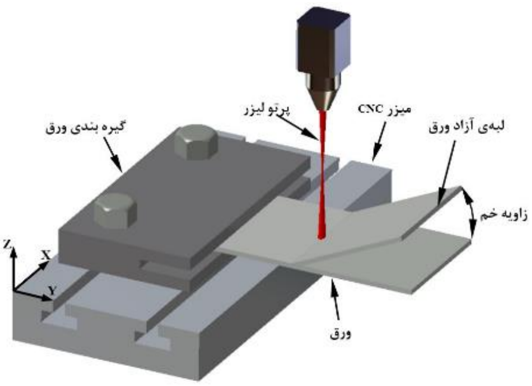
(۳) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

**Email**: bakhshi@nit.ac.ir

## مقدمه

به‌کارگیری روش‌های سنتی مانند خم‌کاری با قالب، برای خم‌کاری و شکل‌دهی قطعات بزرگ مانند بدنه کشتی‌ها و همچنین تولید قطعات با تعداد محصول کم، با محدودیت‌های فراوانی همراه می‌باشد. این محدودیت‌ها موجب تشویق صنعتگران به بهره بردن از روش‌های جایگزین مناسب گردیده است.

فرایند شکل‌دهی با استفاده از پرتو لیزر یک روش شکل‌دهی غیر تماسی است که بدون استفاده از ابزار سخت و نیروی خارجی، از انرژی لیزر برای شکل‌دهی و خم‌کاری ورق‌های فلزی استفاده می‌شود. توانایی شکل‌دهی فلزات با استحکام بالا، عدم استفاده از مجموعه ابزارها، انعطاف‌پذیری سیستم و قابلیت خودکارسازی خوب توأم با سایر کاربردهای لیزر مانند برش و جوش‌کاری از جمله مزیت‌های قابل توجه این روش در مقایسه با سایر فرایندهای شکل‌دهی سنتی است. این مزیت‌ها عمدتا ناشی از استفاده از پرتو لیزر به‌عنوان بخشی از ابزار تغییر شکل در فرایند می‌باشد [1]. امروزه این فرایند در صنایع مختلف هوافضا، کشتی‌سازی و صنعت میکروالکترونیک به کار گرفته می‌شود [2]. در این فرایند، با پرتو لیزر با سرعت مشخص بر روی سطح ورق یک گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق ایجاد می‌شود. این امر، موجب ایجاد تنش‌های حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌شود. اگر میزان حرارت‌دهی موضعی به‌اندازه‌ای باشد که تنش حرارتی ایجاد شده در قطعه از حد الاستیک ماده بیشتر گردد، در این حالت کرنش‌های حرارتی تبدیل به کرنش‌های پلاستیک فشاری به‌صورت موضعی می‌شوند. ابتدا در اثر کرنش‌های پلاستیک کششی در سطوح بالایی که بزرگ‌تر از کرنش ایجاد شده در سطوح پایین هستند، یک خم منفی در قطعه ایجاد می‌شود و لبه ورق به سمت پایین خم می‌شود، اما با گذشت زمان و خنک شدن قطعه، سطوح بالایی آن بیشتر منقبض می‌گردد و در نهایت خم مثبت در قطعه و رو به بالا به صورت دائمی ایجاد می‌شود [3]. اساس فرایند شکل‌دهی با پرتو لیزر شکل‌دهی ورق با اعمال تنش‌های حرارتی است که در اثر تابش پرتو لیزر در آن القا می‌شود. نحوه توزیع دمای القا شده در اثر تابش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، مشخص کننده مکانیزم شکل‌دهی است. توزیع دمایی در قطعه‌کار به پارامترهای فرایند نظیر توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو و ضخامت قطعه‌کار بستگی دارد [4, 5]. گیگر و ولرتسن [6] سه مکانیزم فرایند شکل‌دهی با پرتو لیزر را که عبارت از مکانیزم‌های گرادیان دمایی، کمانش و کوتاه کردن است، شناسایی نمودند. آنان از مکانیزم گرادیان دمایی در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نمودند. شکل (۱) نمایی از فرایند خم‌کاری با لیزر را نمایش می‌دهد.




شکل ۱ تصویر شماتیک از فرایند خم‌کاری با اشعه لیزر

اولین فعالیت‌ها در استفاده از لیزر به‌منظور شکل‌دهی ورق‌های فلزی در سال ۱۹۸۶ توسط نامبا انجام شد [7]. پس از آن، بسیاری از محققان از پرتو لیزر به‌عنوان ابزاری برای شکل‌دهی استفاده کرده‌اند و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شد. ریاحی و همکاران [8] به بررسی اثر توزیع شار حرارتی یکنواخت و گوسی در اندازه‌های مختلف توان، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر بر زاویه خم پرداختند. ورق استفاده شده در این مطالعه از یک ورق دولایه از جنس (Al/Sic) بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع شار حرارتی یکنواخت، زاویه خم بیشتری نسبت به توزیع شار حرارتی گوسی ایجاد می‌کند. یانجین و همکاران [9] اثر خواص مواد را در فرایند خم‌کاری با لیزر صفحه فلزی از جنس فولاد مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، ضریب انبساط حرارتی رابطه مستقیم با مقدار شکل‌دهی دارد. همچنین افزایش ضریب هدایت حرارتی عامل محدود کننده شکل‌دهی نهایی است. صفری و همکاران [10] شکل‌دهی سطوح استوانه‌ای با شعاع انحنای دلخواه را بر روی ورق فولاد کم‌کربن به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق یاد شده پارامترهای مربوط به لیزر با توجه به شرایط دستگاه لیزر ثابت فرض شد و

پارامتر لازم برای شکل‌دهی سطح ورق به صورت استوانه‌ای با شعاع انحنای دلخواه پیشنهاد و معرفی شد. از آنجایی که فرایند شکل‌دهی با لیزر از جمله فرایندهای شکل‌دهی بدون قالب می‌باشد، تولید قطعات با هندسه مشخص در آن پیچیده است زیرا در این فرایند باید پارامترهای لیزر و ورق اولیه طوری تنظیم شود که منجر به تولید قطعه با هندسه مشخص شود. باوجود چندین پارامتر متغیر، دست‌یابی به یک زاویه خم مشخص در فرایند خم‌کاری با لیزر پیچیده می‌باشد. در این زمینه تحقیقاتی توسط سایر محققان انجام شده است. به طور نمونه، یک مطالعه تجربی در زمینه اثر عوامل مؤثر بر خم‌کاری ورق‌های فلزی از جنس آلومینیوم و فولاد توسط شیچون و همکارش [3] صورت گرفته است. به این ترتیب، پارامترهای مؤثر بر زاویه خم به سه دسته پارامترهای وابسته به انرژی لیزر، پارامترهای وابسته به جنس ورق و پارامترهای هندسی ورق تقسیم گردید. حسین‌پور و همکاران [11] در یک مطالعه تجربی و آماری با استفاده از یک لیزر نئودیوم- یاگ پالسی، اثر پارامترهای فرایندی مانند خواص ماده، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو لیزر، ضخامت ورق و تعداد اسکن پرتو لیزر را بر زاویه خم بررسی کردند. در این مطالعه از دو جنس ورق فولاد St-12 و فولاد ۳۰۴ برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای تعداد اسکن پرتو لیزر، جنس ماده، ضخامت ورق، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی خم ورق دارند. مولای و همکاران [12] یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی زاویه خم برای ورق‌های AISI 304 پیشنهاد کردند. علاوه بر این، آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف فرایند مانند توان لیزر و سرعت اسکن را بر زاویه خم در فرایند خم‌کاری با لیزر بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی زاویه خم دقیق را برای فرایند خم‌کاری با لیزر چند پاسه پیش‌بینی می‌کند. همچنین میزان زاویه خم در فرایند خم‌کاری با لیزر چند پاسه به پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن بستگی دارد. در سال ۲۰۲۰ بونپوانگ و همکاران [13] بهینه‌سازی پارامترهای فرایند خم‌کاری با لیزر را با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای ورق‌های فولاد ضدزنگ بررسی کردند. علاوه بر این، آن‌ها اثر سه پارامتر نرخ تکرار پالس، توان لیزر و زمان اسکن را هم مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که زاویه خم با افزایش نرخ تکرار پالس و توان لیزر افزایش، اما زاویه خم با افزایش زمان اسکن کاهش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که توان لیزر بالاتر و زمان اسکن کمتر تأثیر معنی‌داری بر زاویه خم دارد. در همان سال بهرا و همکاران [14] از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به حداکثر زاویه خم در فرایند خم‌کاری با لیزر استفاده کردند. چهار پارامتر ورودی توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو لیزر و مدت زمان پالس برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر زاویه خم که می‌توان با در نظر گرفتن این پارامترهای بهینه به دست آورد، ۲۰ درجه بود. علاوه بر این، از بین چهار پارامتر مورد بررسی در این مطالعه، قطر پرتو لیزر بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد. ونکادشواران و همکاران [15] از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی رابطه بین زاویه خم و پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن و ضخامت ورق در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق ALSI 304 استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر بهینه پارامترها باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه کل عملیات برای یک زاویه خم خاص می‌شود. در سال ۲۰۱۳ زهرانی و مراچی [16] پارامترها را برای به دست آوردن حداکثر زاویه خم در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق فولادی AISI 1010 از طریق روش سطح پاسخ (RSM) و با استفاده از طرح باکس بنکن (BBD) مدل‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتیجه این بهینه‌سازی منجر به ارائه ترکیب‌های پارامتری بهینه شده است که در آن با کنترل پارامترها، زاویه خم حداکثر خواهد بود. روحی و همکاران [17] تأثیر چهار پارامتر فرایند شامل ضخامت ورق، توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن را بر روی شکل‌دهی با لیزر ورق Al6061-T6 بررسی کردند. آن‌ها از روش سطح پاسخ (RSM) به‌منظور محدود کردن آزمایش‌های مورد نیاز برای کاهش هزینه‌ها و تعیین اثر پارامترها بر زاویه خم استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان لیزر و زاویه اسکن رابطه مستقیم با زاویه خم دارند، در حالی که ضخامت ورق و سرعت اسکن رابطه عکس دارند. در سال ۲۰۱۶ تأثیر گرادیان دما در ورق‌های آلومینیوم Al 6061-T6 برای سه ضخامت بر زاویه خم توسط روحی و همکاران [18] مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر چهار پارامتر شامل توان لیزر، سرعت اسکن، تعداد اسکن و ضخامت ورق بر گرادیان دمایی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) مطالعه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که گرادیان دما رابطه مستقیم با میزان زاویه خم ایجاد شده در ورق دارد. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که از بین پارامترهای ورودی، توان لیزر و ضخامت ورق تأثیر مستقیم دارند و سرعت اسکن و قطر پرتو

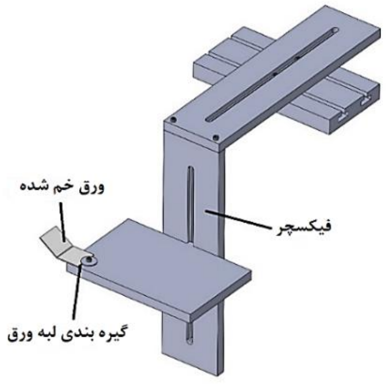
تأثیر معکوس بر بزرگی گرادیان دما دارند. در سال ۲۰۲۰ خنداندل و همکاران [19] ایده جدیدی بر اساس روش اسکن دایره‌ای ارائه کردند که در قالب دو طرح گام‌به‌گام و معکوس ارائه شده است. با توجه به نتایج آن‌ها، استخراج دقیق مسیر اسکن لیزری برای تمام شکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی آسان خواهد بود. از آنجایی که این استراتژی قابل برنامه‌ریزی است، می‌توان تنها با تغییر پارامترهای ورودی، از این روش برای طراحی و پیاده‌سازی شکل‌های مختلف استفاده کرد. تحقیق دیگری توسط خنداندل و همکاران [20] انجام شده است که در آن تأثیر خنک‌سازی اجباری بر شکل‌دهی لوله لیزر به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که خنک‌سازی موضعی با آب، مدت زمان خم ۱ درجه را در مقایسه با خنک‌سازی در دمای محیط، حدود ۸ تا ۱۳ برابر کاهش می‌دهد.

در مقاله حاضر چگونگی و میزان تأثیر پارامترهای مختلف در فرایند خم‌کاری با لیزر مانند پارامترهای انرژی لیزر و پارامترهای هندسی ورق بر روی زاویه خم و همچنین بهینه کردن مقدار آن‌ها به‌منظور دست‌یابی به حداکثر زاویه خم، با استفاده از روش‌های تجربی، عددی و آماری بر روی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب، مسئله مورد تحقیق در این مقاله، رسیدن به درک درست نسبت به رفتار پارامترهای مختلف فرایند بر زاویه خم و دست‌یابی به بیشترین مقدار زاویه خم با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای موجود فرایند می‌باشد.

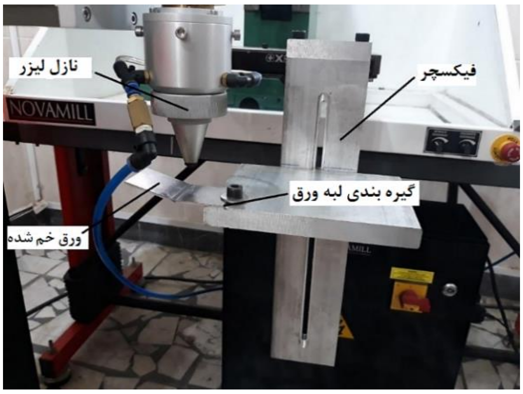
## مراحل انجام پژوهش

### مواد و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG مدل PMT ۴۲۹۷ با حداکثر توان ۴۰۰W استفاده شد. کله‌گی دستگاه ثابت بوده و حرکت قطعه کار توسط یک میز با کنترل عددی انجام می‌شد. ورق استفاده شده از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابعاد ۲ × ۵۰ × ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. پس از برش قطعه کار، سطح آن با محلول استون تمیز شد. همچنین سطح ورق توسط اسپری گرافیت پوشانده شد تا ضریب جذب پرتو لیزر افزایش یابد. علاوه بر این، برای محدود کردن لبه ورق و قرار دادن قطعه کار در زیر نازل لیزر، در ابتدا یک فیکسچر طراحی و ساخته شد که می‌تواند در راستای عمودی (z) تنظیم و جابه‌جا شود. از جابه‌جایی در جهت z برای تنظیم قطر پرتو لیزر استفاده شده است. شکل (۲) فیکسچر طراحی شده را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان زاویه خم ایجاد شده در قطعه کار از یک دستگاه اندازه‌گیری مختصات CMM مدل Mora3 با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر استفاده شد. با توجه به اینکه فرایند خم‌کاری با لیزر یک فرایند حرارتی است، ایجاد اعوجاج حرارتی در لبه آزاد ورق امری اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، مقدار خطای ناچیزی بین ۰/۰۲۷- ۰/۰۴۱ درجه هنگام اندازه‌گیری زاویه با استفاده از دستگاه CMM در قطعات خم شده مشاهده شد. روش اندازه‌گیری زاویه خمش با استفاده از دستگاه CMM بدین صورت بوده است که در ابتدا موقعیت ۴ تا ۵ نقطه بر روی هر یک از صفحات خم شده ورق مشخص شد. سپس با تعیین صفحه عبوری از طریق نقاط شناسایی شده، زاویه بین دو صفحه در نرم‌افزار Inca 3D محاسبه گردید. شکل (۳) نمونه‌ای از قطعه خم‌کاری شده را نشان می‌دهد.




شکل ۲ شماتیک فیکسچر طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها




شکل ۳ تجهیزات استفاده شده در انجام آزمایش‌ها

### شبیه‌سازی عددی

در مقاله حاضر از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS)

نسخه ۲۰۱۷ به‌منظور شبیه‌سازی فرایند خم‌کاری با لیزر استفاده شده است. قابلیت تحلیل ترکیبی مکانیکی و حرارتی این نرم‌افزار به‌طور هم‌زمان امکان تحلیل و مدل‌سازی را در این فرایند فراهم کرده است [21]. شار حرارتی ایجاد شده توسط پرتو لیزر منجر به تغییرات دمای بالا می‌شود که بر خواص مواد تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، از خواص وابسته به دما در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. خواص فیزیکی و مکانیکی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین از شرایط مرزی مکانیکی برای محدود کردن جابه‌جایی ورق در طول فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است. به این منظور، دو نوع گیره‌بندی یک‌سرگیردار و گیره‌بندی V شکل مرسوم است. در روش گیره‌بندی V شکل قطعه‌کار بر روی دو پایه ساده نگه داشته می‌شود. در روش گیره‌بندی یک‌سرگیردار، یک انتهای ورق توسط گیره بسته می‌شود و تمام شش درجه آزادی آن محدود می‌گردد. جابه‌جایی ورق به‌منظور ایجاد زاویه خم از انتهای آزاد ورق اتفاق می‌افتد. در این مطالعه در انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی از شیوه گیره‌بندی یک‌سر گیردار به‌منظور مقید کردن حرکت ورق استفاده شده است.

برای مدل کردن منبع حرارت لیزر با توزیع حرارت گوسی‌شکل، لازم است منبع حرارتی به‌وسیله یک زیر برنامه DFLUX به زبان فرترن به نرم‌افزار آباکوس داده شود. زیربرنامه DFLUX به‌منظور تعریف شار حرارتی با توزیع غیریکنواخت و به‌صورت تابعی از موقعیت، زمان و دما در تحلیل مسائل انتقال حرارت استفاده می‌شود. مقدار چگالی شار حرارتی وارد بر سطح از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2{r^2}_1}{r^2}\right) \quad (۱)$$

بنابراین مقدار شار حرارتی متوسط در محدوده قطر اشعه لیزر از انتگرال‌گیری تابع شار حرارتی در دامنه شعاع پرتو لیزر محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2}\int_0^r I(2\pi r_1)dr_1 = \frac{2\pi}{\pi r^2}\int_0^r \frac{2AP}{\pi r^2}\exp\left(-\frac{2{r^2}_1}{r^2}\right)(r_1)dr_1 = \frac{0/865AP}{\pi r^2} \quad (۲)$$

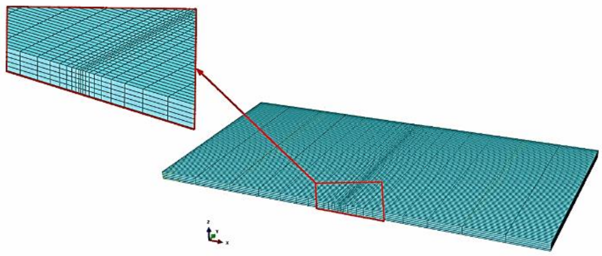
در رابطه بالا A ضریب جذب سطح، P توان خروجی لیزر، r شعاع پرتو لیزر و $r_1$ فاصله بین نقطه مورد بررسی و مرکز پرتو لیزر است [9].

به‌منظور شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی با لیزر، از المان‌های نوع C3D8T (المان هشت گرهی کوپل حرارتی- با جابه‌جایی ۳ محوره) برای شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور نمایش دقیق شیب حرارتی از تعداد پنج المان در راستای ضخامت ورق استفاده شده است (شکل ۴).

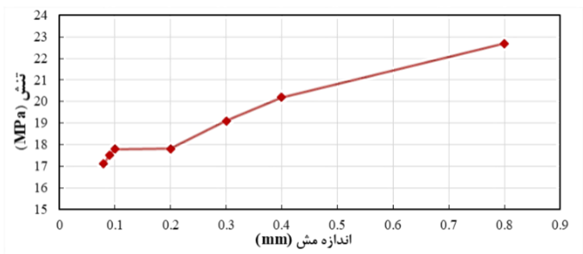
جدول ۱ مشخصات ماده وابسته به دما برای AA 6061 T6 [22]

| T (C) | Yield stress (MPa) | Young's modulus (GPa) | T (C) | Specific heat (J/Kg C) | Density (Kg/m$^3$) | T (C) | Conductivity (W/m C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰ | ۱۲۵ | ۷۰ | ۲۰ | ۸۹۸ | ۲۷۵۰ | ۲۰ | ۱۷۰ |
| ۱۰۰ | ۹۵ | ۷۰ | ۱۲۰ | ۹۵۱ | ۲۷۳۰ | ۵۸۵ | ۲۲۰ |
| ۲۰۰ | ۵۵ | ۶۱ | ۲۲۰ | ۱۰۰۳ | ۲۷۱۰ | – | – |
| ۳۰۰ | ۲۷ | ۵۵/۶ | ۳۲۰ | ۱۰۵۵ | ۲۶۹۰ | – | – |
| ۴۰۰ | ۱۵ | ۴۹/۳ | ۴۲۰ | ۱۱۰۸ | ۲۶۶۰ | – | – |
| ۵۰۰ | ۵ | ۴۱/۳ | ۵۸۷ | ۱۱۹۵ | ۲۶۳۰ | – | – |
| ۶۰۰ | ۵ | ۵ | ۶۴۴ | ۱۲۰۰ | ۲۴۵۰ | – | – |

برای به‌دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی، از همگرایی تنش در راستای عبور پرتو لیزر استفاده شده است. از این رو، برای به دست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان، مدل‌هایی با اندازه دانه‌بندی مختلف، شبیه‌سازی شد. اندازه شبکه به صورت مرحله‌ای کاهش یافت تا نتایج مورد نظر همگرا گردد. با توجه به نتایج به دست آمده، با کاهش اندازه از ۰/۴ به ۰/۲mm تغییر محسوسی در توزیع تنش معادل به وجود می‌آید، در حالی که اختلاف توزیع تنش با تغییر اندازه شبکه از ۰/۱ به ۰/۲ mm کمتر از ۰/۲ درصد است. این در حالی است که زمان اجرای شبیه‌سازی با المان ۰/۱mm، بیش از دو برابر زمان اجرای شبیه‌سازی با المانی به ابعاد ۰/۲ است؛ بنابراین اندازه المان ۰/۲mm به‌عنوان اندازه مناسب برای شبیه‌سازی استفاده شد (شکل ۵). تعداد کل المان استفاده شده برای مدل ۱۱۵۰۰ می‌باشد.



شکل ۴ شبکه‌بندی مدل سه‌بعدی




شکل ۵ اندازه شبکه به‌دست آمده برای المان

## بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

مدل‌سازی رفتاری فرایند روشی است که می‌تواند با حذف آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه، دقت قابل قبولی را ارائه دهد. یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل‌سازی رفتاری، روش سطح پاسخ (RSM) است. روش سطح پاسخ (RSM) شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی است که برای ساخت مدل‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از به‌کارگیری این روش، تعیین یک رابطه بین پاسخ (Y) و تعدادی از متغیرهای قابل کنترل یا ورودی می‌باشد که با $X_1, X_2, \ldots, X_K$ نمایش داده می‌شود. مدل برازش به‌صورت ترکیبی از ضریب تأثیر عوامل ورودی در خود آن عوامل تعریف می‌شود. این مدل در حالت کلی، طبق معادله (۴) تعریف می‌شود.

$$Y = \beta_o + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ij} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (۴)$$

در این معادله $\beta_O$ ضریب تأثیر عوامل ورودی، $\beta_i$ عامل مؤثر بر پاسخ و k تعداد عوامل هستند. در مدل برازش از پارامترهایی استفاده می‌شود که دارای تأثیر معنی‌داری بر متغیر پاسخ باشند [23]. روش‌های سطح پاسخ (RSM) می‌توانند بسته به کاربردشان در طرح آزمایش به روش‌های متفاوتی از جمله طراحی باکس بنکن (BBD) و طراحی ترکیب مرکزی (CCD) تقسیم می‌شود. در این مقاله به منظور بهینه‌سازی و ارزیابی تأثیر پارامترها در فرایند خم‌کاری با لیزر از طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. همچنین در مطالعه حاضر از نرم‌افزار Design-Expert-11 برای طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این روش نسبت به روش طراحی باکس بنکن (BBD) این است که در RSM تمامی پارامترها در پنج سطح بررسی می‌شوند. این پنج سطح به صورت (α–، 1-، 0، 1+، α+) کدگذاری می‌شوند [24]. به طور کلی تعداد نقاط طراحی به روش ترکیب مرکزی (CCD) با معادله (۳) تعیین می‌شود.

$$n = 2^k + k + n_O \qquad (۳)$$

در این رابطه $n_O$ برابر با تعداد نقاط مرکزی می‌باشد. طراحی به شیوه ترکیب مرکزی از ترکیب یک طراحی مرتبه اول عاملی ۲k به تعداد ۲k از نقاط طراحی اضافی موسوم به نقاط محوری و $n_O$ نقاط مرکزی به‌دست می‌آید. با تعریف هشت پارامتر و تعیین پنج سطح برای هر عامل تعداد آزمایش‌ها به‌منظور بهینه‌سازی به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) برابر ۲۸۲ آزمایش خواهد بود. در مقاله حاضر کلیه ۲۸۲ آزمایش به‌منظور بهینه‌سازی زاویه خم، شبیه‌سازی شد. جدول (۲) پارامترهای انتخاب شده و مقادیر مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. همان طوری که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، زمان استپ به عنوان

یک پارامتر مستقل در نظر گرفته شد. زمان استپ، مقدار زمانی است که اشعه لیزر از لبه ورق به عنوان نقطه شروع، عرض ورق را طی می‌کند و مجدد به نقطه اولیه برمی‌گردد تا پاس بعدی را شروع کند. از آنجایی که فرایند خم‌کاری با لیزر یک فرایند چند پاسه است، بنابراین فاصله زمانی بین دو پاس متوالی می‌تواند مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

جدول ۲ پارامترهای مورد بررسی و سطوح متناظر آن‌ها

| فاکتورها | واحد | علامت | سطح‌ها | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | −α | −1 | 0 | +1 | +α |
| توان | W | P | ۳۷۵ | ۴۰۰ | ۴۲۵ | ۴۵۰ | ۴۷۵ |
| قطر پرتو لیزر | mm | D | ۱/۵ | ۲ | ۲/۵ | ۳ | ۳/۵ |
| سرعت اسکن | mm/s | V | ۱۴ | ۱۸ | ۲۲ | ۲۶ | ۳۰ |
| زمان استپ | s | t | ۸ | ۱۰ | ۱۲ | ۱۴ | ۱۶ |
| تعداد اسکن | – | n | ۳ | ۵ | ۷ | ۹ | ۱۱ |
| طول ورق | mm | L | ۹۰ | ۱۰۰ | ۱۱۰ | ۱۲۰ | ۱۳۰ |
| عرض ورق | mm | W | ۴۰ | ۵۰ | ۶۰ | ۷۰ | ۸۰ |
| ضخامت ورق | mm | S | ۲ | ۲/۵ | ۳ | ۳/۵ | ۴ |

## نتایج و بحث

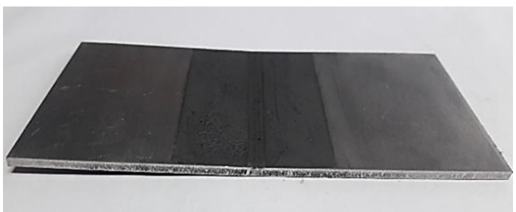
### نتایج تجربی

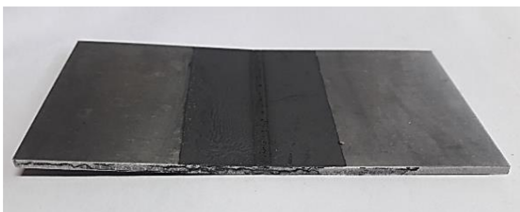
به‌منظور بررسی قابلیت تکرارپذیری فرایند خم‌کاری با لیزر، برای هر مقدار توان لیزر، دو نمونه AA 6061 به ضخامت ۲mm تحت آزمایش قرار گرفت و بعد از خم‌کاری، مقدار زاویه خم برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. مقادیر پارامترها به همراه زاویه خم به‌دست آمده، در جدول (۳) آورده شده است. مقدار پارامترهای طول، عرض، ضخامت و زمان استپ در آزمایش‌های تجربی، ثابت در نظر گرفته شد. هدف از تغییر سایر پارامترها مانند توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن ایجاد شرایط متفاوتی برای آزمایش تجربی بود تا تکرارپذیری فرایند در آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف بررسی شود.

همان طوری که ملاحظه می‌شود، در یک توان معین، مقدار زاویه خم هر دو نمونه با خطای بسیار کمی مشابه یکدیگرند. بیشترین و کمترین درصد خطا برای تکرارپذیری فرایند، به ترتیب برابر با ۲ و ۰/۳ درصد است که به ترتیب متعلق به توان‌های ۲۲۰ و ۲۷۰W می‌باشد. نمونه‌ای از ورق‌های خم‌کاری شده با اشعه لیزر به همراه مقدار هر پارامتر برای انجام آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. بدین ترتیب، این نتیجه حاصل شد که خم‌کاری ورق AA 6061 با فرایند خم‌کاری با لیزر دارای تکرارپذیری مناسب می‌باشد.

جدول ۳ پارامترهای مورد بررسی و مقادیر آن برای آزمایش‌های تجربی

| توان، P (W) | سرعت اسکن، V (mm/s) | قطر پرتو لیزر، D (mm) | تعداد اسکن، n | زاویه خم نمونه ۱ (درجه) | زاویه خم نمونه ۲ (درجه) | میزان خطا (٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۲۰ | ۱۰ | ۳ | ۷ | ۰/۶۳۶ | ۰/۶۴۹ | ۲ |
| ۲۴۰ | ۱۵ | ۳ | ۱۰ | ۰/۷۸۴ | ۰/۷۸۹ | ۰/۶ |
| ۲۷۰ | ۱۰ | ۳ | ۸ | ۱/۱۷۱ | ۱/۱۶۸ | ۰/۳ |
| ۳۳۰ | ۱۵ | ۳ | ۸ | ۱/۲۹۶ | ۱/۲۳۸ | ۱ |

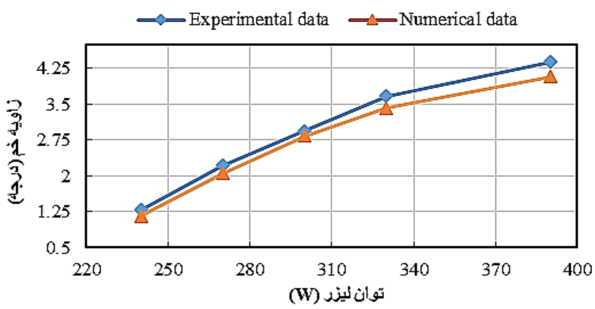

(الف)


(ب)

شکل ۶ قطعات خم‌کاری شده در آزمایش‌های تجربی با شرایط تنظیمی: W۲۴۰, P=۱۰mm, n=۲mm/s, S=۱۵mm, V=۳D=
(الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲

## صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی فرایند

در این مقاله از مقایسه نتایج آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. به ایـن منظـور، آزمـایش تجربـی برای پنج مقدار تـوان ۲۴۰، ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰ و ۳۹۰ وات انجـام شد، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شـد. نتـایج حاصل از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی در شکل (۷) نشـان داده شده است. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود، تطـابق خوبی بین زاویه خم به دست آمده از شبیه‌سازی انجـام شـده و آزمایش‌های تجربی وجود دارد.

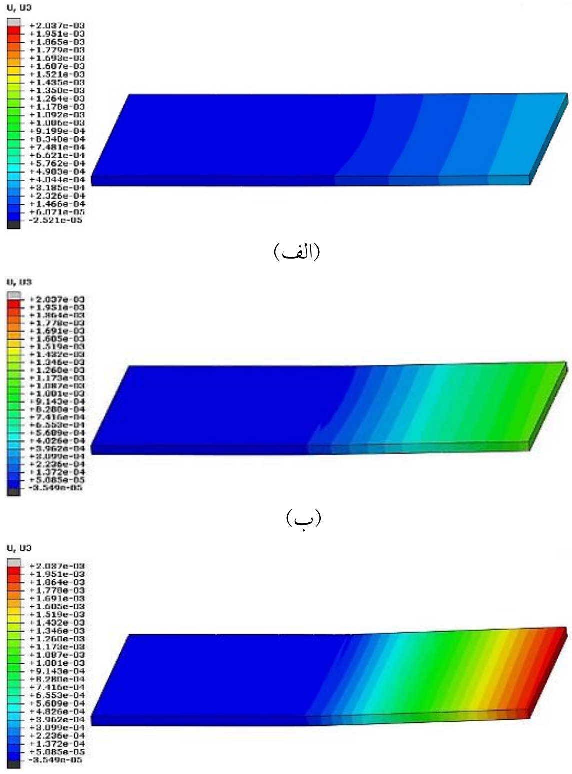



شکل ۷ مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی با شرایط:
D=۳mm, V=۱۸mm/s, S=۲mm, n=۹

## نتایج شبیه‌سازی عددی

نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی که نحوه جابه‌جایی لبه آزاد ورق و همچنین تصویر توزیع دمای ورق در حین فرایند خم‌کاری با لیزر را نشان می‌دهد، به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. در این شبیه‌سازی زمان کل فرایند ۷۰ ثانیه می‌باشد. شرایط تنظیم پارامترها برای نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده برابر با توان لیزر ۴۵۰W، قطر پرتوی لیزر ۲mm، سرعت اسکن ۱۸mm/s، ضخامت ورق ۲/۵mm و تعداد عبور پرتوی لیزر ۵ در نظر گرفته شده است. همان طوری که در شکل (۸) نشان داده شده است، با ادامه پیمایش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، میزان زاویه خم افزایش می‌یابد. در انتهای فرایند، میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از روابط مثلثاتی به زاویه خم تبدیل می‌شود. زاویه خم به دست آمده در شبیه‌سازی شکل زیر برابر با ۲/۳۳۴ درجه می‌باشد.

یکی از نکات مهم در خم‌کاری با پرتو لیزر و استفاده از سازوکار گرادیان دمایی، وقوع یک خم منفی در ابتدای فرایند است که به علت کم بودن مقدار آن، هنگام انجام آزمایش دیده نمی‌شود. این پدیده در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نمودار جابه‌جایی لبه آزاد ورق نسبت به زمان انجام فرایند، قابل مشاهده است. شکل (۱۰) نمودار جابه‌جایی- زمان را که از شبیه‌سازی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد. شرایط تنظیم پارامترها برای نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل (۱۰) برابر با توان لیزر ۴۲۵W، قطر پرتوی لیزر ۲/۵mm، سرعت اسکن ۲۲mm/s، ضخامت ورق ۳mm و تعداد عبور پرتوی لیزر ۳ در نظر گرفته شده است. نمودار نشان داده شده در شکل (۱۰) مربوط به گرهی است که در لبه آزاد ورق و با فاصله عرضی ۲۵mm قرار دارد. این پدیده در ابتدای فرایند، به دلیل تابش پرتو لیزر بر روی سطح ورق و ایجاد انبساط حرارتی بیشتر در سطح بالایی که به علت اختلاف درجه حرارت در راستای ضخامت است، در قطعه‌کار به وجود می‌آید. مقدار هر یک از پارامترها برای دست‌یابی به سازوکار گرادیان دمایی بسیار مهم است. در ادامه فرایند، به‌خصوص در مرحله سرد شدن ورق، خم منفی به دلیل انقباض در سطح بالای ورق از بین می‌رود و در نهایت خم نهایی ورق به سمت تابش پرتو لیزر خواهد بود [2]. نکته دیگر قابل توجه در شکل، میزان اندک کاهش جابه‌جایی به ازای هر بار عبور پرتو لیزر می‌باشد، به‌طوری که میزان جابه‌جایی در پاس سوم کمتر از مقدار جابه‌جایی در پاس اول می‌باشد. دلیل این امر آن است که خم ایجاد شده در قطعه‌کار بر نیمی از هندسه پرتو تابشی تأثیر می‌گذارد. منظور از هندسه پرتو تابشی، شعاع پرتو لیزر می‌باشد. هر چه زاویه خم ورق در شکل‌دهی‌های چند پاسه به ازای هر بار عبور پرتو لیزر افزایش پیدا می‌کند، آن قسمت از پرتو لیزر که بر روی زانوی خم قطعه (طول آزاد ورق) تابیده می‌شود، به‌طور فزاینده‌ای شکل بیضی به خود می‌گیرد، به طوری که سطح مقطع پرتو لیزر بر روی سطح ورق، همچنان که قطعه دچار خم می‌شود، به‌صورت ترکیبی از نیم‌دایره و نیم‌بیضی در می‌آید. بدیهی است که بر میزان واپیچش نیمه‌بیضی به ازای هر بار عبور پرتو لیزر افزوده خواهد شد. واپیچش سطح پرتو لیزر، یک افزایش مؤثر در مساحت پرتو تابشی بر روی نمونه و به تبع آن، کاهش چگالی انرژی را به همراه دارد. این موضوع می‌تواند بر میزان خم در هر پاس تابشی اثر بگذارد.



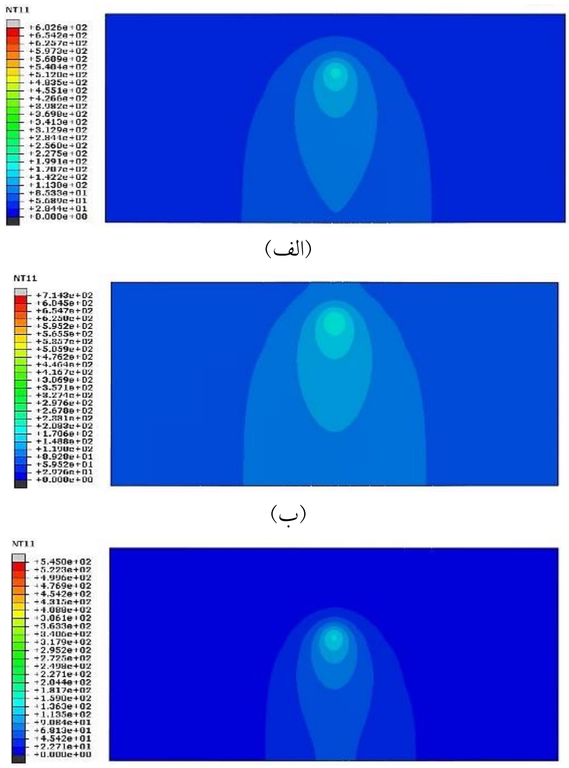
(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۸ کانتور جابه‌جایی ورق آلومینیوم در حین فرایند

الف) ۳/۴۹۰ ثانیه، ب) ۳۵/۰۱۷ ثانیه، ج) ۷۰ ثانیه



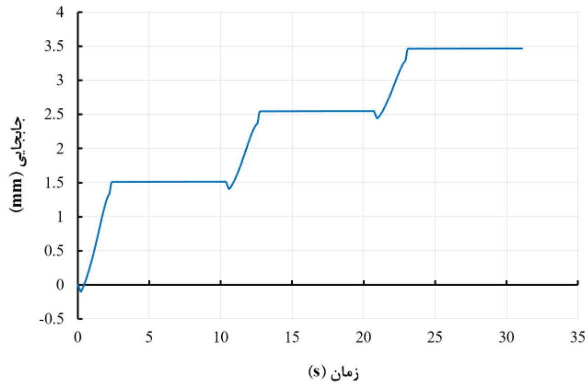
(الف)

(ب)

(ج)

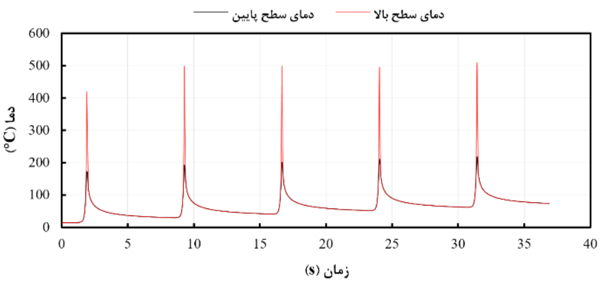
شکل ۹ کانتور توزیع دمایی ورق آلومینیوم در حین فرایند

الف) ۱/۶۶۲ ثانیه، ب) ۳۰/۰۵۶ ثانیه، ج) ۵۸/۰۳۹ ثانیه



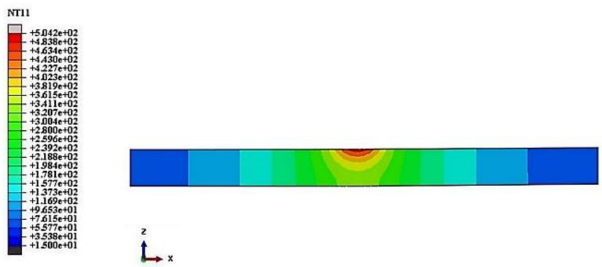

شکل ۱۰ نمودار زمان - جابه‌جایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی

در شکل (۱۱) نمودار دما نسبت به زمان نشان داده شده است. این نمودار اختلاف دما بین سطوح بالا و پایین ورق را که از شبیه‌سازی به‌دست آمده، نشان می‌دهد. اختلاف دمای ایجاد شده عامل ایجاد سازوکار گرادیان دمایی است. بیشترین مقدار دمای ایجاد شده در این آزمایش بر روی سطح بالای ورق ۵۰۴ °C و بیشترین اختلاف دما در زمان ۹/۲۹۲ ثانیه رخ می‌دهد، زمانی که پرتو لیزر در مرحله دوم از مرکز صفحه عبور می‌کند. حداکثر اختلاف دما بین سطوح بالایی و پایینی ورق ۳۵۰°C است. شکل (۱۲) گرادیان دمایی ایجاد شده در راستای ضخامت ورق را نشان می‌دهد.




شکل ۱۱ نمودار دما- زمان در مرکز صفحه به دست آمده از شبیه‌سازی

با شرایط تنظیمی: n=۵، S=۲mm، V=۱۸mm/s، P=۴۰۰W، D=۳mm



شکل ۱۲ کانتور توزیع دما در امتداد ضخامت ورق

## نتایج حاصل از طراحی ترکیب مرکزی (CCD)

در این بخش تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه و همچنین مقادیر بهینه به دست آمده در فرایند خم‌کاری با لیزر، به طور مجزا و کامل توضیح داده شده است.

مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های آزمایش، برازش منحنی برای پاسخ‌های غیر خطی است که معمولا از طریق رگرسیون انجام می‌شود. بهترین مدل برازش مربوط به چندجمله‌ای با بیشترین درجه و بیشترین مقدار برای F-value می‌باشد. مقدار F-value در مدل استفاده شده برابر با ۲۲۴/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. همچنین پارامترهای آماری مانند p-value و مقادیر $R^2$ برای مقایسه و انتخاب مدل‌ها استفاده می‌شوند. مقدار سطح اطمینان در مطالعه حاضر برابر با ۹۵ درصد انتخاب شده است. این بدان معنی است که مقادیر p-value کوچک‌تر از ۵ درصد نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار p-value برای مدل انتخاب شده کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. همچنین مدل انتخابی باید واجد این شرایط باشد که اختلاف بین دو مقدار Predicted $R^2$ و Adjusted $R^2$ کمتر از ۰/۲ باشد که مقدار به دست آمده در این مطالعه برابر ۰/۰۱ می‌باشد. با توجه به نکات ذکر شده، مدل درجه دوم به عنوان مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل پیشنهادی به همراه مقادیر $R^2$، Predicted $R^2$ و Adjusted $R^2$ در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴ مدل پیشنهادی بر اساس نتایج به دست آمده

| Source | Std. Dev. | $R^2$ | Adjusted $R^2$ | Predicted $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| Linear | ۰/۴۸۱۳ | ۰/۸۲۳۹ | ۰/۸۱۸۷ | ۰/۸۱۱۷ |
| Quadratic | ۰/۸۱۸۲ | ۰/۹۷۶۶ | ۰/۹۷۲۳ | ۰/۹۶۶۵ |
| 2FI | ۰/۲۲۰۳ | ۰/۹۶۶۹ | ۰/۹۶۲۰ | ۰/۹۵۸۲ |

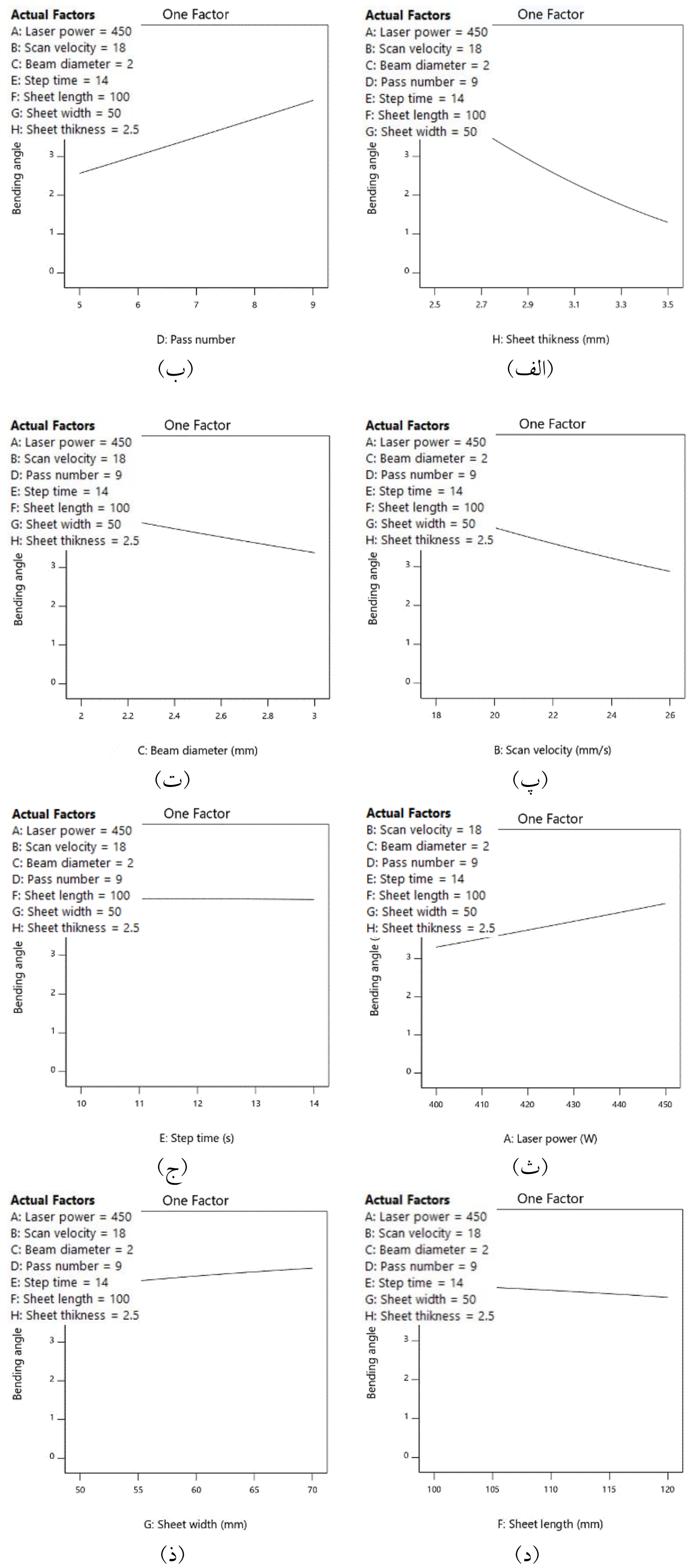
مدل رگرسیون برای پیش‌بینی تابع هدف، یعنی زاویه خم استفاده می‌شود. مقدار $R^2$ کیفیت برازش داده‌های واقعی را با مدل مشخص می‌کند و بهترین مقدار آن $R^2 = ۱$ می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مقدار $R^2$ بیانگر مقدار تشابه مقادیر واقعی با مقادیر به دست آمده توسط مدل است و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که توافق خوبی بین مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل وجود دارد. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که مقادیر $R^2$ و Adjusted $R^2$ نزدیک به ۱ (۱۰۰٪) است که نشان می‌دهد مدل به دست آمده از تحلیل می‌تواند پاسخ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. در تحقیق حاضر مقدار $R^2$ برابر ۰/۹۷۶۶ می‌باشد، به این معنی که مدل حاضر می‌تواند زاویه خم را با دقت ۹۷٪ پیش‌بینی کند. علاوه بر این، Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز (S/N) را اندازه‌گیری می‌کند که در این مقاله مقدار آن ۶۸/۴۶۸۲ برای مدل به دست آمد. به طور کلی نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است. بر این اساس نسبت به دست آمده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان نسبت مناسب تلقی شود. معادله رگرسیون حاوی پارامتر مؤثر برای پیش‌بینی زاویه خم می‌باشد که با معادله (۵) بیان می‌شود. این فرمول از پارامترهایی تشکیل شده است که مقدار p-value متناظر آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است (جدول ۵)؛ به عبارت دیگر، این فرمول شامل پارامترهایی است که در جدول ANOVA به‌عنوان پارامترهای مؤثر معرفی شده‌اند.

$$\alpha_b = 0.9172 - 0.2932A - 0.3626B - 0.2798C + 0.3986D - 0.0205E - 0.0669F + 0.1066G - 0.8059H - 0.0554AB - 0.0404AC + 0.0903AD + 0.0322AG - 0.1432AH - 0.1222BD + 0.2146BH - 0.0249CD + 0.1286CH + 0.0418DG - 0.267DH + 0.0496FH - 0.0381GH + 0.0711B^2 + 0.27H^2 \quad (۵)$$

## تأثیر پارامترهای فرایند

تأثیر پارامترهای مورد بررسی در این مقاله در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این در حالی است که برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر زاویه خم، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۳– الف) بیانگر تأثیر ضخامت ورق بر زاویه خم است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر اساس طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD)، می‌توان گفت که با افزایش ضخامت از ۲/۵mm به ۳/۵mm، زاویه خم از ۱/۷ به ۰/۳۷۹ درجه کاهش پیدا کرده است؛ یعنی به ازای افزایش ۱mm ضخامت ورق در دو آزمایش با ترکیب پارامترهای مشخص بر اساس طراحی آزمایش انجام شده در این تحقیق، زاویه خم حدود ۷۷٪ کاهش یافت. دلیل این کاهش عدم خم منفی اولیه قابل توجه در ابتدای فرایند در لایه‌های پایینی ورق است. مقدار تنش حرارتی ایجاد شده در لایه‌های زیرین ورق توسط پرتوهای لیزر به تنش جریان ماده نمی‌رسد؛ بنابراین،

لایه‌های زیرین از خم شدن ورق جلوگیری می‌کنند. همچنین با افزایش ضخامت ورق، مدول خمشی مورد نیاز برای خم شدن ورق افزایش می‌یابد که خم کردن ورق را دشوارتر می‌کند. تأثیر تعداد اسکن پرتو لیزر در شکل (۱۳- ب) نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که با افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، مقدار زاویه خم افزایش می‌یابد.




شکل ۱۳ تأثیر پارامترهای بررسی شده بر زاویه خم

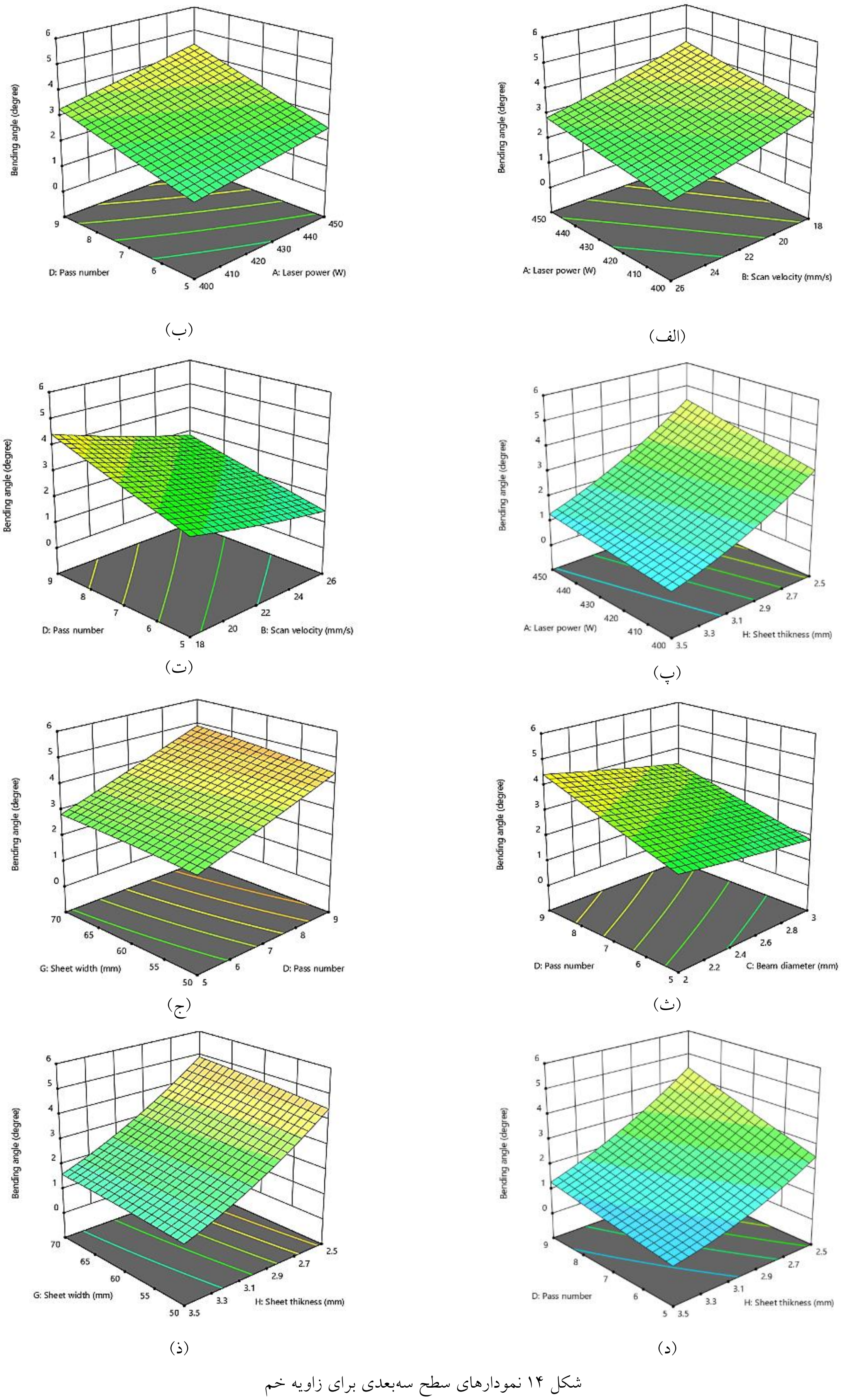
به طوری که با افزایش تعداد اسکن از ۵ به ۹، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند، زاویه خم ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش تعداد اسکن به معنای تکرار تابش پرتو لیزر است که زاویه خم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان داد که میزان افزایش زاویه خم در هر مرحله نسبت به مرحله قبل اندکی کاهش می‌یابد. تأثیر سرعت اسکن بر زاویه خم در شکل (۱۳– پ) نشان داده شده است. همان طوری که در شکل نشان داده شده است، با افزایش سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کم خواهد شد. دلیل آن این است که با افزایش سرعت اسکن، مقدار انرژی حرارتی اعمال شده بر روی سطح ورق در راستای مسیر اسکن، کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه داشت که در ورق از جنس آلومینیوم به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارت بالا، با کاهش بسیار زیاد سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که اگر مقدار سرعت اسکن کم باشد، دما در سطح بالای ورق افزایش می‌یابد و به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای ورق آلومینیوم، دما به سرعت از سطح بالای به سطح پایین ورق انتقال پیدا می‌کند. در نتیجه شیب حرارتی مورد نیاز در راستای ضخامت ورق که برای ایجاد خم ضروری است، کاهش می‌یابد و به تبع آن زاویه خم هم کاهش خواهد یافت. شکل (۱۳– ت) اثر قطر پرتو لیزر بر روی زاویه خم را نشان می‌دهد. با افزایش قطر پرتو لیزر با فرض ثابت ماندن توان، انرژی حرارتی لیزر در سطح بزرگ‌تری توزیع می‌شود. در نتیجه، تأثیر قطر پرتو لیزر در تشکیل گرادیان حرارتی که عامل اصلی شکل‌دهی است، کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، با بزرگ‌تر شدن قطر پرتو شدت انرژی وارد بر واحد سطح ورق کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار زاویه خم نیز کمتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که توان لیزر رابطه مستقیمی با زاویه خم در این فرایند دارد، یعنی با افزایش توان لیزر بر میزان زاویه خم افزوده می‌شود (شکل ۱۳– ث). همان طوری که در بخش گذشته بیان شد، لیزر استفاده شده در این مطالعه از نوع پالسی است. در لیزرهای پالسی مقدار انرژی برای هر پالس از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$P_e = P \times P_w \qquad (۶)$$

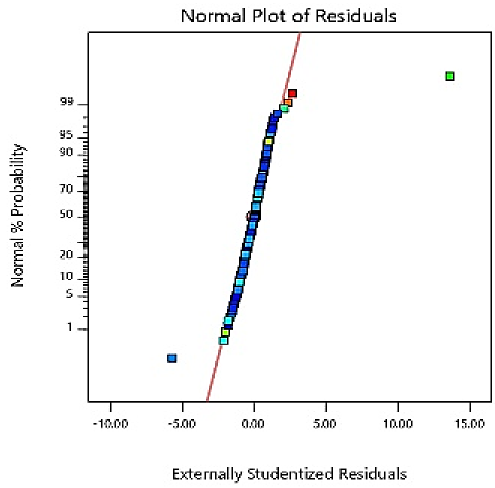
در این رابطه، $P_e$ انرژی هر پالس، $P$ توان و $P_w$ عرض پالس می‌باشد. با توجه به رابطه بالا با فرض ثابت بودن مقدار عرض پالس، اگر مقدار توان افزایش یابد مقدار انرژی به ازای هر پالس نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان لیزر به معنای افزایش انرژی حرارتی به سطح ورق و به تبع آن، افزایش شیب حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌باشد. در نتیجه زاویه خم افزایش خواهد یافت. همان طوری که در شکل‌های (۱۳ ج تا ذ) مشاهده می‌شود شیب نمودار برای سه پارامتر زمان استپ، طول ورق و عرض ورق کمترین مقدار را در مقایسه سایر پارامترها دارند. علاوه بر این با مشاهده مقادیر F-value برای این سه پارامتر که نشان دهنده میزان و نوع اثرگذاری هر پارامتر بر زاویه خم است و با مقایسه آن با سایر پارامترها مشاهده می‌شود که مقادیر F-value مربوط به این سه پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر ناچیز است؛ بنابراین پارامترهای زمان استپ، طول ورق و عرض ورق، تأثیر زیادی روی زاویه خم ندارند به طوری که می‌توان اثر این سه پارامتر را در این فرایند بر روی زاویه خم نادیده گرفت.

نمودارهای سطح سه‌بعدی بر اساس معادله (۵) هستند و می‌توانند برای درک شهودی پاسخ در حالتی استفاده شوند که ترکیبات مختلفی از پارامترهای ورودی وجود دارد. شکل (۱۴) نمودارهای سطح سه‌بعدی مربوط به زاویه خم را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار قطر پرتو و پارامترهای سرعت اسکن، زاویه خمش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش توان لیزر و تعداد اسکن منجر به افزایش زاویه خم می‌شود. بدیهی است که افزایش ضخامت ورق منجر به کاهش قابل توجه زاویه خم می‌شود.

نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۳) برای نتیجه‌گیری قطعی استفاده نمی‌شوند. به‌منظور تأیید اثرات نشان داده شده برای پارامترها، از تحلیل واریانس استفاده می‌شود. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع خطا، ثابت بودن واریانس و استقلال آن انجام می‌شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده تحلیل آماری ANOVA برای این مطالعه در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول، مؤثر بودن یا نبودن پارامترها و همچنین میزان تأثیر هر یک از پارامتر بررسی شده در فرایند، بیان شده است. نرمال بودن توزیع خطا توسط نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی مانده بررسی می‌شوند. نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی مانده برای نتایج حاصل از نتایج انجام شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به روند توزیع نقاط در اطراف خط مورب می‌توان گفت که مقادیر باقی مانده از توزیع نرمال برخوردار است.



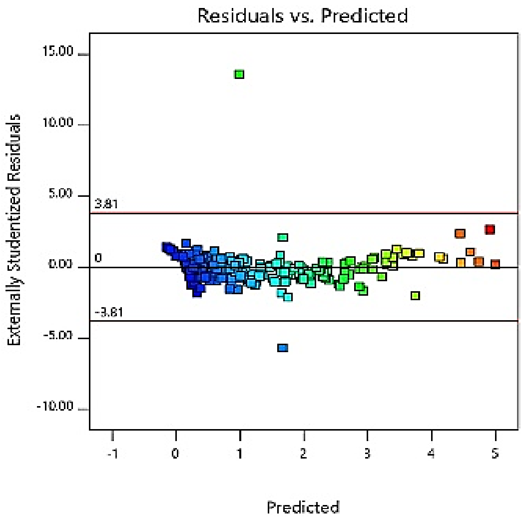

شکل ۱۴ نمودارهای سطح سه‌بعدی برای زاویه خم




شکل ۱۵ نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی مانده

در روش دیگر، مدل ارائه شده توسط نمودار مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده بررسی می‌شود. نمودار فوق در شکل (۱۶) نشان داده شده است. عدم وجود یک روند مشخص در توزیع نقاط در این نمودار نشان دهنده ثابت بودن واریانس است [25]. این دو شکل صحت فرض‌های تحلیل واریانس را تأیید می‌کند.

در جدول (۴) از Sum of squares و Mean squre برای محاسبه F-value استفاده شده است. مقدار F-value میزان اثرگذاری هر پارامتر را در فرایند بیان می‌کند. به طور کلی هر چه این مقدار برای هر پارامتر بیشتر باشد تأثیر آن پارامتر در فرایند بیشتر خواهد بود. با توجه به مقدار F-value در جدول (۵)، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن پرتو، سرعت اسکن، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، عرض ورق، طول ورق و زمان هر استپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارند.




شکل ۱۶ نمودار مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر برازش شده

جدول ۵ تحلیل واریانس برای پارامترها

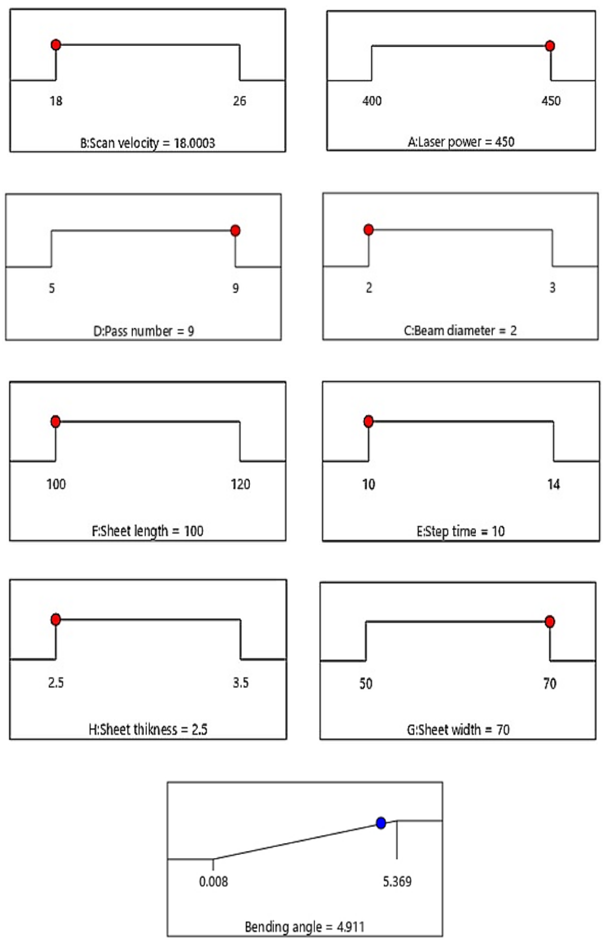
| Source | Sum of squares | Mean square | F Value– | P -value |
|---|---|---|---|---|
| Model | ۳۵۰/۶۱ | ۷/۹۷ | ۲۲۴/۹۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| A-Laser power | ۲۲/۶۹ | ۲۲/۶۹ | ۶۴۰/۵۲ | <۰/۰۰۰۱ |
| B-Scan velocity | ۳۴/۷۲ | ۳۴/۷۲ | ۹۷۹/۹۰ | <۰/۰۰۰۱ |
| C-Beam diameter | ۲۰/۶۷ | ۲۰/۶۷ | ۵۸۳/۴۶ | <۰/۰۰۰۱ |
| D-Pass number | ۴۱/۹۵ | ۴۱/۹۵ | ۱۱۸۴/۲۰ | <۰/۰۰۰۱ |
| E-Step time | ۰/۱۱۰۸ | ۰/۱۱۰۸ | ۳/۱۳ | ۰/۰۷۸۲ |
| F-Sheet length | ۱/۱۸ | ۱/۱۸ | ۳۳/۳۵ | <۰/۰۰۰۱ |
| G-Sheet width | ۳ | ۳ | ۸۴/۷۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| H-Sheet thickness | ۱۷۱/۴۵ | ۱۷۱/۴۵ | ۴۸۳۹/۲۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| AB | ۰/۷۸۴۹ | ۰/۷۸۴۹ | ۲۲/۱۵ | <۰/۰۰۰۱ |
| AC | ۰/۴۱۷۷ | ۰/۴۱۷۷ | ۱۱/۷۹ | ۰/۰۰۰۷ |
| AD | ۲/۰۹ | ۲/۰۹ | ۵۸/۹۶ | <۰/۰۰۰۱ |
| AE | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۳۲۰۵ | ۰/۵۷۱۸ |
| AF | ۰/۰۳۶۸ | ۰/۰۳۶۸ | ۱/۰۴ | ۰/۳۰۹۲ |
| AG | ۰/۲۶۴۹ | ۰/۲۶۴۹ | ۷/۴۸ | ۰/۰۰۶۷ |

ادامهٔ جدول ۵ تحلیل واریانس برای بارامترها

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| AH | ۵/۲۵ | ۵/۲۵ | ۱۴۸/۲۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| BC | ۰/۰۸۲۳ | ۰/۰۸۲۳ | ۲/۳۲ | ۰/۱۲۸۹ |
| BD | ۳/۸۲ | ۳/۸۲ | ۱۰۷/۸۹ | <۰/۰۰۰۱ |
| BE | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۰۵۵۱ | ۰/۸۱۴۶ |
| BF | ۰/۱۲۴۷ | ۰/۱۲۴۷ | ۳/۵۲ | ۰/۰۶۱۸ |
| BG | ۰/۰۳۹۶ | ۰/۰۳۹۶ | ۱/۱۲ | ۰/۲۹۱۶ |
| BH | ۱۱/۷۹ | ۱۱/۷۹ | ۳۳۲/۷۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| CD | ۲/۳۰ | ۲/۳۰ | ۶۵/۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| CE | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۳۱۲۳ | ۰/۵۷۶۸ |
| CF | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۰۸۸۷ | ۰/۷۶۶۱ |
| CG | ۰/۱۷۰۶ | ۰/۱۷۰۶ | ۴/۸۲ | ۰/۰۲۹۲ |
| CH | ۴/۲۳ | ۴/۲۳ | ۱۱۹/۴۹ | <۰/۰۰۰۱ |
| DE | ۰/۰۱۲۹ | ۰/۰۱۲۹ | ۰/۳۶۴۸ | ۰/۵۴۶۴ |
| DF | ۰/۰۵۹۳ | ۰/۰۵۹۳ | ۱/۶۷ | ۰/۱۹۶۹ |
| DG | ۰/۴۴۷۰ | ۰/۴۴۷۰ | ۱۲/۶۲ | ۰/۰۰۰۵ |
| DH | ۱۸/۲۵ | ۱۸/۲۵ | ۵۱۵/۲۵ | <۰/۰۰۰۱ |
| EF | ۰/۰۳۵۳ | ۰/۰۳۵۳ | ۰/۹۹۶۹ | ۰/۳۱۹۱ |
| EG | ۰/۰۸۲۳ | ۰/۰۸۲۳ | ۲/۳۲ | ۰/۱۲۸۹ |
| EH | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۹۱۸۹ |
| FG | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۱۵۹۰ | ۰/۶۹۰۴ |
| FH | ۰/۶۲۹۵ | ۰/۶۲۹۵ | ۱۷/۷۷ | <۰/۰۰۰۱ |
| GH | ۰/۳۷۱۱ | ۰/۳۷۱۱ | ۱۰/۴۷ | ۰/۰۰۱۴ |
| $A^2$ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۷۶۰۲ | ۰/۰۹۳۳ |
| $B^2$ | ۰/۱۷۷۰ | ۰/۱۷۷۰ | ۰/۰۲۶۴ | ۵/۰۰ |
| $C^2$ | ۰/۰۱۹۱ | ۰/۰۱۹۱ | ۰/۴۶۳۸ | ۰/۵۳۸۶ |
| $D^2$ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۷۷۸۲ | ۰/۰۷۹۵ |
| $E^2$ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۷۷۳۷ | ۰/۰۸۲۹ |
| $F^2$ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۵۸۲۱ | ۰/۳۰۳۸ |
| $G^2$ | ۰/۰۳۴۳ | ۰/۰۳۴۳ | ۰/۳۲۶۴ | ۰/۹۶۷۱ |
| $H^2$ | ۲/۵۵ | ۲/۵۵ | ۷۲/۰۳ | <۰/۰۰۰۱ |
| Residual | ۸/۴۰ | ۰/۰۳۵۴ | – | – |
| Lack of Fit | ۸/۴۰ | ۰/۰۳۶۸ | – | – |
| Pure Error | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰۱۸ | – | – |
| Adeq Precision | ۶۸/۴۶۸۲ | – | – | – |
| Cor Total | ۳۵۹/۰۱ | – | – | – |

## بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی با لیزر

هدف از بهینه‌سازی در این مقاله، رسیدن به بیشترین مقدار برای زاویه خم است. با در نظر گرفتن حدود مشخص شده برای پارامترهای فرایند که در جدول (۲) ذکر شد، مقدار بهینه برای دستیابی به حداکثر مقدار زاویه خم برای هر پارامتر در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷، حداکثر زاویه خم زمانی به دست می‌آید که پارامترهای توان لیزر (۴۵۰W)، تعداد اسکن (۹) و عرض ورق (۷۰mm) در سطح بالا و سرعت اسکن (۱۸mm/s)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، طول ورق (۱۰۰mm)، زمان استپ (۱۰s) و ضخامت ورق (۲/۵mm) در سطح پایین قرار داشته باشند. همچنین، در شکل ۱۷ کمترین (°۰۰۸/۰) و بیشترین (°۳۶۹/۵) مقدار واقعی برای زاویه خم را نشان می‌دهد. در حالی که حداکثر زاویه خم پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون با در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای هر پارامتر، °۴/۹۱۱ می‌باشد.




شکل ۱۷ مقادیر بهینه برای هر پارامتر

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای موجود در فرایند خم‌کاری با پرتو لیزر در ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. هم‌چنین، به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و روش‌های آماری، پارامترهای مورد نظر جهت دستیابی به حداکثر زاویه خم بهینه شدند. پس از بررسی تمامی موارد ذکر شده در مورد بهینه‌سازی و تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی زاویه خم، نتایج زیر به دست آمد:

۱. در بین هشت پارامتر بررسی شده، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن، سرعت اسکن، توان لیزر و قطر اشعه لیزر به‌عنوان پارامترهایی که به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زاویه خم داشتند، معرفی شده‌اند.

۲. زمان گام، طول و عرض ورق به عنوان پارامترهایی که به ترتیب کمترین تأثیر در فرایند را دارند شناخته شدند.

۳. اثر هشت پارامتر بر زاویه خم در فرایند خم‌کاری با پرتو لیزر بررسی گردید. نتایج بررسی‌های انجام شده به روش تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پارامترهای ضخامت ورق، قطر اشعه لیزر و سرعت اسکن پرتو لیزر، زمان استپ و طول ورق رابطه عکس با زاویه خم و پارامترهای توان لیزر، تعداد اسکن و عرض ورق رابطه مستقیم با زاویه خم در فرایند خم‌کاری با پرتو لیزر دارند.

۴. در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشاهده شده است که مقدار زاویه خم به ازای افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، افزایش می‌یابد اما مقدار افزایش زاویه در تعداد پاس‌های بالا به ازای هر پاس به مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند.

۵. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که حداکثر زاویه خم به دست آمده توسط مدل (۴/۹۱۱ درجه) زمانی به دست می‌آید که ضخامت ورق (۲/۵mm)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، زمان استپ (۱۰s)، طول ورق (۱۰۰mm) و سرعت اسکن (۱۸mm/s) در سطح پایین باشند و تعداد اسکن (۹)، عرض ورق (۷۰mm) و توان لیزر (۴۵۰W) در سطح بالا قرار داشته باشند.

## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| دما | T |
| شار حرارتی | I |
| شار حرارتی متوسط | $I_m$ |

| | |
|---|---|
| ضریب جذب سطح | $A$ |
| توان لیزر | $P$ |
| شعاع پرتو لیزر | $r$ |
| تعداد نقاط مرکزی | $n_O$ |
| تعداد فاکتور | $K$ |
| قطر پرتو لیزر | $D$ |
| سرعت اسکن | $V$ |
| زمان استپ | $t$ |
| تعداد اسکن | $n$ |
| طول ورق | $L$ |
| عرض ورق | $W$ |
| ضخامت ورق | $S$ |
| ضریب تأثیر پارامترها | $\beta_O$ |
| پارامترهای مؤثر بر پاسخ | $\beta_i$ |
| متغیر پاسخ | $Y$ |
| زاویه خم | $\alpha_b$ |
| انرژی هر پالس | $P_e$ |
| عرض پالس | $P_w$ |

**واژه‌نامه**

| | |
|---|---|
| روش سطح پاسخ | Response Surface Methodology (RSM) |
| طرحی ترکیب مرکزی | Central Composite Design (CCD) |
| طرحی باکس بنکن | Box-Behnken Design (BBD) |
| روش اجزای محدود | Finite Element Method (FEM) |
| طرحی تاگوچی | Taguchi Design |
| آنالیز نتایج | Analysis of variance (ANOVA) |
| هدایت حرارتی | Thermal Conductivity |
| ظرفیت گرمایی | Heat capacity |
| انبساط حرارتی | Thermal expansion |
| مدول یانگ | Young's modulus |
| تنش تسلیم | Yield stress |

## تقدیر و تشکر

## مراجع

[1] M. Geiger, F. Vollertsen, and G. Deinzer, "Flexible straightening of car body shells by laser forming", *SAE Technical Paper*, 1993. https://doi.org/10.4271/930279

[2] Y. Shi, H. Shen, Z. Yao, and J. Hu, "Numerical investigation of straight-line laser forming under the temperature gradient mechanism", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 19, no. 2, pp. 144-150, 2006. https://doi.org/10.1016/S1006-7191(06)60036-7

[3] W. Shichun, and Z. Jinsong, "An experimental study of laser bending for sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 2, pp. 160-163, 2001. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00860-8

[4] Z. Hu, R. Kovacevic, and M. Labudovic, "Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 13, pp. 1427-1439, 2002. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00075-5

[5] Y. Guan, H. Zhang, J. Liu, and S. Sun, "Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 662-671, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.010

[6] M. Geiger, and F. Vollertsen, "The mechanisms of laser forming", *CIRP Annals*, vol. 42, no. 1, pp. 301-304, 1993. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62448-2

[7] Y. Namba, "Laser forming in space", *in: Proceedings of the International Conference on Lasers' 85*, Las Vegas,

NV; 2-6 Dec, pp. 403-407, 1986.

[8] M. Riahi, M. Hoseinpour Gollo, and S. Nader Ameli Kalkhoran, "Experimental and numerical study of heat flux distribution in laser forming of bi-layer sheets", *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 4, no. 1, pp. 67-79, 2014. https://doi.org/10.22061/jcarme.2014.73

[9] Y. Guan, S. Sun, G. Zhao, and Y. Luan, "Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 1, pp. 124-131, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.003

[10] M. Safari, and H. Mostaan, "Experimental and numerical investigation of laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 1941-1949, 2016. https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.033

[11] M. H. Gollo, S. M. Mahdavian, and H. M. Naeini, "Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd: YAG laser", *Optics & Laser Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 475-482, 2011. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.07.004

[12] S. Mulay, V. Paliwal, and N. R. Babu, "Analytical approach to predict the bend angle of sheet formed by multiple laser scans", *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 272-277, 2021. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.040

[13] R. Boonpuang, M. Mongkolwongroj, A. Sakulkalavek, and R. Sakdanuphab, "Empirical modeling and optimization of laser bending process parameters using the central composite design method for HDD slider PSA/RSA adjustment", *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, pp. 290-304, 2020. https://doi.org/10.1007/s40516-020-00122-2

[14] A. Behera, P. S. Sahu, and S. K. Patel, "Application of Taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2323-2327, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.500

[15] K. Venkadeshwaran, S. Das, and D. Misra, "Bend angle prediction and parameter optimisation for laser bending of stainless steel using FEM and RSM", *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, vol. 5, no. 3-4, no. 3-4, pp. 308-321, 2021. https://doi.org/10.1504/IJMMS.2012.048237

[16] E. G. Zahrani, and A. Marasi, "Modeling and optimization of laser bending parameters via response surface methodology", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 227, no. 7, pp. 1577-1584, 2013. https://doi.org/10.1177/0954406212461119

[17] A. H. Roohi, H. Moslemi Naeini, and M. Hoseinpour Gollo, "An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 231, no. 5, pp. 433-442, 2015. https://doi.org/10.1177/1464420715599181

[18] A. H. Roohia, H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, J. Shahbazai Karimi, and Sh. Imani shahabad, "Effects of temperature gradient magnitude on bending angle in laser forming process of aluminium alloy sheets", *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 5, no. 2, pp. 97-109, 2016. https://doi.org/10.22061/jcarme.2016.423

[19] S. E. Khandandel, S. M. H, Seyedkashi, and M. Moradi, "A novel path strategy design for precise 2D and 3D laser tube forming process; experimental and numerical investigation", *Optik*, vol. 206, pp. 164302, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164302

[20] S. E. Khandandel, S. M. H. Seyedkashi and M. Moradi, "Numerical and experimental analysis of the effect of forced cooling on laser tube forming", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 338, 2021. https://doi.org/10.1007/s40430-021-03063-9

[21] M, A, Bhatti, "Fundamental finite element analysis and applications: with Mathematica and Matlab computations", 2005.

[22] J. Zimmerman, W. Wlosinski, and Z. R. Lindemann, "Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1644-1653, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.012

[23] E. G. Zahrani, and A. Marasi, "Experimental investigation of edge effect and longitudinal distortion in laser bending process", *Optics & Laser Technology*, vol. 45, pp. 301-307, 2013. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.031

[24] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, “Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments,” *John Wiley & Sons*, 2016.

[25] D. C. Montgomery, “Design and analysis of experiments”, *John wiley & sons*, 2017.